區域試驗多性狀產量指標之穩定性分析

史凱萱 [1]、陳凱儀 [1]、呂秀英 [2]、呂椿棠 [2]、周國隆 [3]、劉力瑜 [1,*]

[1] 國立臺灣大學農藝學系

[2] 行政院農業委員會農業試驗所

[3] 行政院農業委員會高雄區農業改良場作物改良課

摘要

作物區域試驗資料之穩定性分析，係探討作物品系在不同環境下是否具有穩定表現。傳統的穩定性分析方法，僅針對單一性狀，尤其是收穫產量；然而作物品種改良，有可能同時考量諸多性狀作為品種選拔基準。因此，本研究以毛豆區域試驗 17 個性狀資料為分析實例，提出利用多變數統計方法之集群分析與因素分析，先針對多個性狀進行篩選並建立綜合指標後，再進行穩定性分析。結果顯示，運用集群分析篩選出毛豆 10 個穩健性狀，該等性狀經由因素分析擷取出可分別解釋株型、經濟產量及能量分配之三個因素，以其中經濟產量因素之得點為例進行直線回歸穩定性分析，得以選拔出符合育種目標下具有優良表現且穩定之品系。

關鍵詞：區域試驗、穩定性分析、多變數分析、集群分析、因素分析。

Stability Analysis of Yield Indices for Multiple Traits in Regional Trials

Kai-Hsuan Shih[1], Kai-Yi Chen[1], Hsiu-Ying Lu[2], Chun-Tang Lu[2], Kuo-Lung Chou[3] and Li-yu D Liu[1,*]

[1] Department of Agronomy, National Taiwan University, Taipei 10227, Taiwan ROC

[2] Taiwan Agricultural Research Institute, Wufeng District, Taichung City 41362, Taiwan ROC

[3] Crop Improvement Section, Kaohsiung District Agricultural Research and Extension Station, Changjhih, Pingtung Hsien 90846, Taiwan ROC

ABSTRACT

The stability analysis traditionally investigates the stability of yield for a crop grown in multiple environments. However, in some crop breeding programs, multiple traits are simultaneously considered and it is desired to analyze the data using multivariate statistics. In this study, we proposed to select robust traits by cluster analysis and to generate a composite index for all selected traits by factor analysis; the composite index was then subject to regular stability analysis. Our methodology had been practiced on vegetable soybean regional trial data with records of 17 traits. The results showed that cluster analysis identified ten robust traits and factor analysis extracted three factors representing plant type, economic value, and energy partition of the crop, respectively. We used the scores of economic-value factor to perform linear regression stability analysis and had demonstrated that the stable varieties that mostly achieve the specific breeding objective had been selected.

Key words: Regional trials, Stability analysis, Multivariate data analysis, Cluster analysis, Factor analysis.

前言

在作物育種程序中，利用區域試驗資料進行穩定性分析(stability analysis)，可了解候選品系的產量在不同環境下是否能穩定表現良好。國內育種計畫最常使用的穩定性分析法，包含 Finlay and Wilkinson (1963)、Eberhart and Russell (1966)、Perkins and Jinks (1968) 等，均係利用直線迴歸(linear

---

* 通信作者, lyliu@ntu.edu.tw

投稿日期：2014 年 4 月 3 日
接受日期：2014 年 5 月 14 日
作物、環境與生物資訊 11:80-87 (2014)
Crop, Environment & Bioinformatics 11:80-87 (2014)
189 Chung-Cheng Rd., Wufeng, Taichung 41362, Taiwan ROC

regression)進行穩定性分析(Chen and Kuo 2002a, Lu 2004, Hwu and Liu 2013)。近年來多變數分析(multivariate analysis)亦廣為應用於區域試驗，透過解構產量的品系與環境交感效應之主成分(principle components; PCs)，探討品系在不同環境間的穩定性或適應性，其中 AMMI (additive main effects and multiplicative interaction)模式與 GGE (Genotype plus Genotype x Environment)模式均屬此類(Zobel *et al.* 1988, Shafii *et al.* 1992, Shafii and Price 1998, Chen and Kuo 2002b, 2003)。

直線迴歸、AMMI 模式、GGE 模式等穩定性分析法均針對區域試驗的單一性狀(尤以產量為主)，然而產量為數量遺傳性狀，總產量常由數個產量構成要素運算而來。另在某些作物品種選拔過程中，育種目標不僅只在最終收穫產量，還包括其他產量相關之重要性狀。以毛豆區域試驗資料為例，一般視為最終產量之合格莢重是由總莢重與合格莢率的乘積而得，合格莢率與總莢重亦是經由其他觀察到之農藝性狀線性組合而成，性狀間常有高度相關；適當的植株高度，則有利於機械採收，也是毛豆品種改良的重要選拔性狀。一旦同時考量諸多性狀作為品種選拔基準時，上述單一性狀之穩定性方法就有所侷限。因此，本研究提出利用集群分析(cluster analysis)與因素分析(factor analysis)兩種多變數統計方法，先解構產量構成性狀間的相依性，以建立可同時代表多個性狀的產量指標，然後再以此產量指標進行 Finlay and Wilkinson 穩定性分析。本法有別於 AMMI 與 GGE 模式以多變數統計法解構品系與環境交感之主成分來探討單一性狀之穩定性，而是同時著眼於分析多個性狀之穩定性。最後，本文並以 2008 年至 2010 年 13 個品系(種)於不同期作與地區的毛豆區域試驗多性狀資料之實例，來說明本法在穩定性分析上的應用性，以供區域試驗品種選拔之參考。

材料與方法

本研究以毛豆區域試驗為分析實例，首先將多個產量性狀以集群分析進行相似性分群，並描述各個分群的特徵，藉此探討性狀間的相依性，以利縮減性狀變數；再將縮減後多個變數利用因素分析決定出少數幾個具代表性的因素，並計算出因素得點(factor score)。；最後將因素得點作為性狀綜合指標，以 Finlay and Wilkinson 穩定性分析法對該指標進行穩定性分析。分析程序、相關方法及分析材料詳述如下：

一、集群分析

集群分析將各個性狀(變數)依據其距離遠近分群。距離的計算分為「群內距離」與「群間距離」，群內距離用以計算變數間的距離或相似性，而群間距離則用以判斷群與群之間的關係。本研究中使用(1 – r) / 2，代表群內距離，其中 r 為兩性狀(變數)間的相關係數(coefficient of correlation)。由於產量相關性狀的資料之值域及測量單位可能各不相同，須採用相關係數得以相同的尺度計算變數間的距離，並且可一併提供變數間的相關性資訊(Everitt 2011)。而本研究採用之群間距離計算方法為華德法(Ward's method)與非加權成對分群法(unweighted pair-group method using the average approach; UPGMA)。華德法定義合併兩群的標準為使群內的變異最小，符合歸類在同一群者性質相似的期望，且有不易受到離群值影響之優點 (Everitt 2011)。而 UPGMA 則是將兩群內任兩兩變數組合之距離的平均值定義為群間距離，具有容易計算的優點，也常見於育種與分子領域之集群分析；然使用 UPGMA 之資料，必需符合分子鐘假說(molecular clock)，亦即假定演化的速率為一定值，不隨著時間或狀況改變(Felsenstein 1988)。

本研究集群分析是使用 R 軟體 pvclust 套件的 pvclust 函式進行運算，此函式是利用二階多尺度拔靴法(two-step multiscale

bootstrap resampling)，多次改變樣本數量進行集群分析，以計算出分群結果的拔靴法概度(bootstrap probability; BP)與BP之無偏估機率值 (approximately unbiased probability; AU)，來代表分群的穩健程度(Suzuki and Shimodaira 2006)。各群所估得之 BP 定義為重複進行集群分析之結果中同樣獲得該群的比例，而 AU 代表該 BP 值在不同拔靴條件下無偏估的機率，兩者值域均介於 0 與 1 之間；BP 值越高，表示在不同拔靴樣本中獲得同群的機率越大，亦即該分群結果越穩健，而 AU 越大代表其對應之 BP 值估計的正確率越高。

二、因素分析

因素分析將各個變數進行線性轉換，以探索隱藏在各個性狀後的共同重要因素(Johnson and Wichern 2007)。本研究分析多個產量相關性狀，可以將原本的多性狀用擷取出的因素(factor)替代作為新的產量指標。本研究採用之因素分析方法為主成分法(principal component method)，分析過程是計算出變數之相關矩陣的特徵值(eigenvalue)與特徵向量(eigenvector)後，利用陡坡圖 (scree plot) 或最大概度法(maximum likelihood)決定因素個數，並由每個變數在因素內所佔的權重(weight)或因素負荷(factor loading)來討論因素的生物意義(Johnson and Wichern 2007)。各樣本(品種)於每個因素獲得的分數稱為因素得點(factor score)，而本研究中採用 Bartlett 法得點 (Bartlett score)取得各樣本(品種)的因素得點，因其在計算因素得點時皆具有較高的效率，且估計值為無偏估值(Bartlett 1937, Thomson 1938)。本研究因素分析是使用 R 軟體 stats 套件的 factanal 函式進行運算。

三、Finlay and Wilkinson 穩定性分析

於進行穩定性分析之前，宜先針對產量性狀或指標進行綜合變方分析(combined analysis of variance)，確認基因型與環境的交感效應存在，若交感效應不存在，在實際選拔品種時，可以直接使用該指標或產量平均值作為選拔基準，而不需要再進行穩定性分析(Hwu and Liu 2013)。當基因型與環境交感存在，且基因型與環境交感之直線線性關係存在時，得以進行 Finlay and Wilkinson 穩定性分析。

Finlay and Wilkinson 穩定性分析法是將每個環境下所有品種的產量平均值視為環境指標 (environment index)，各品種在不同環境之產量對環境指標作迴歸分析，其所得的回歸係數 b 作為穩定性係數(stability coefficient)，用以判定該品種的穩定性；當 b 越接近 1，代表該品種產量具有農業穩定性。由於作物育種通常以培育穩定而高產品種為主要目的，允許穩定品種對環境有可預測的固定反應，此基因型對環境改變的變化速率符合農業上的需求(Chen and Kuo 2002a, Lu 2004, Hwu and Liu 2013)。

四、分析材料

本研究分析實例為 2008 年至 2010 年種植於屏東縣萬丹鄉與美濃鎮兩個地點之春秋兩期作下各 13 品系(種)之毛豆區域試驗性狀資料，每一地區期作均採逢機完全區集設計(randomized completed block design)，4 重複(區集)，調查性狀包含植株高度(plant height，以 height 簡稱)、結莢高度(podding height，以 height.pod 簡稱)、分枝數(branch number，以 branch 簡稱)、主莖節數(node number of main stem，以 nodes 簡稱)、植株鮮重(plant fresh weight，以 weight 簡稱)、單粒莢重(weight of one-seeded pods，以 w.pod.1 簡稱)、雙粒莢重(weight of two-seeded pods，以 w.pod.2 簡稱)、三粒莢重(weight of three-seeded pods，以 w.pod.3 簡稱)、四粒莢重(weight of four-seeded pods，以 w.pod.4 簡稱)、單株總莢數(pod number per plant，以 n.pod 簡稱)、單株總莢重(pod weight per plant，以 w.pod 簡稱)、百莢重(100-pod weight，以

hpw 簡稱)、百粒重(100-seed weight，以 hsw 簡稱)、剝實率(shelling percentage，以 percent 簡稱)、總莢重(total pod weight，以 t.p.yield 簡稱)、合格莢率(graded pod rate，以 grade.p.rate 簡稱)、合格莢重(graded pod weight，以 grade.p.weight 簡稱)、合格莢指數(index of graded pod，以 index 簡稱)，共 18 種產量相關性狀。進行穩定性分析時，將「年度－期作－地區」組合視為獨立的「環境」(Finlay and Wilkinson 1963)，因此該實例共有 8 個不同的環境(2 年 ×2 期作 ×2 地區)。18 個調查性狀中，由於四粒莢較少被觀測到，資料點大多為 0，因此本研究在進行統計分析時並未納入四粒莢重。

結果與討論

首先將毛豆區域試驗共 17 個性狀(變數)資料進行集群分析，以 13 個品系(種)與 8 個環境組合之產量平均值作為重複(共 104 個樣本)，使用華德法與 UPGMA 分群法所得的樹狀圖如 Fig. 1。本研究採以 BP ≥ 90 且 AU ≥ 90 作為分群穩健之判斷基準，發現兩種分群法的結論類似，均顯示三粒莢重與合格莢率、合格莢重與單株總莢重與總莢重、百莢重與百粒重、植株高度與結莢高度與主莖節數，皆穩健各歸為同一群，其餘性狀之分群結果穩健性較低，易隨拔靴樣本不同而改變。為了進一步縮減變數以進行因素分析，在初步集群分析之後，除了排除完全線性相關的單株總莢重(為個別粒數莢重之總和)外，也逐步剔除穩健性較低與分群獨立在外的性狀。一旦某性狀排除後再次進行集群分析對整體分群影響甚小，則剔除該性狀；反之，若排除此性狀後造成分群改變，則保留該性狀並回到上一個步驟。此過程重複進行，直到只留下對分群結果有重大影響之性狀為止。經由上述方式選擇，本研究所保留的性狀有 10 項：植株高度、結莢高度、分支數、主莖節數、植株鮮重、單株總莢重、百莢重、百粒重、合格莢率以及合格莢重。以此 10 個性狀再進行集群分析，結果顯示相當穩健(Fig. 2)。華德法若採以 BP ≥ 90 且 AU ≥ 90 條件篩選，可將性狀分為下列 4 群：

第一群：植株鮮重、單株總莢重、合格莢重；
第二群：分枝數、合格莢率；
第三群：百莢重、百粒重；
第四群：植株高度、結莢高度、主莖節數。

而 UPGMA 以 BP ≥ 90 且 AU ≥ 90 篩選條件可將性狀分為 2 群：

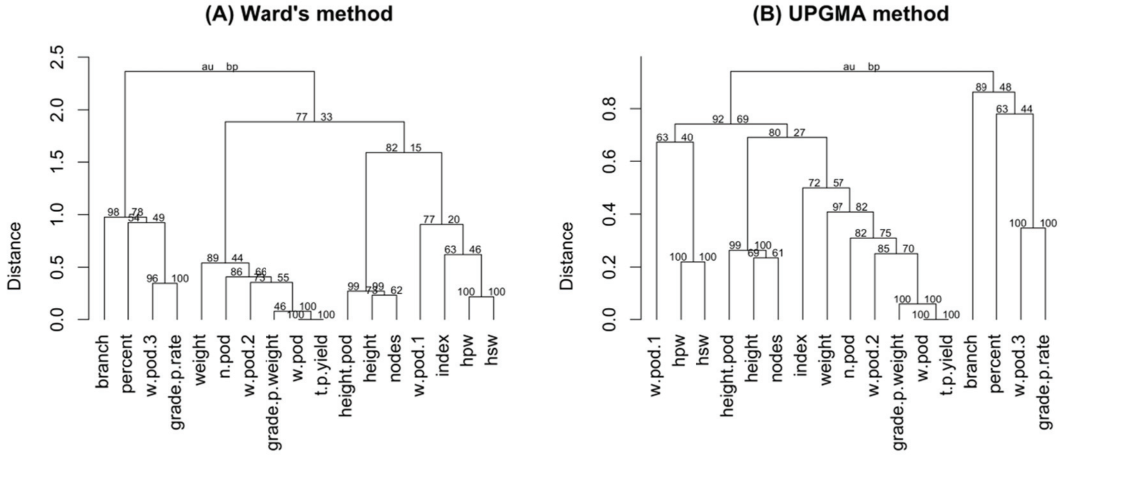

Fig. 1. The results of clustering for 17 agronomic traits of vegetable soybean yield data using (A) Ward's method and (B) UPGMA method. The numbers showing above every horizontal bars are the 100 × probability of approximate unbiasedness (AU) and 100 × bootstrap probability (BP).

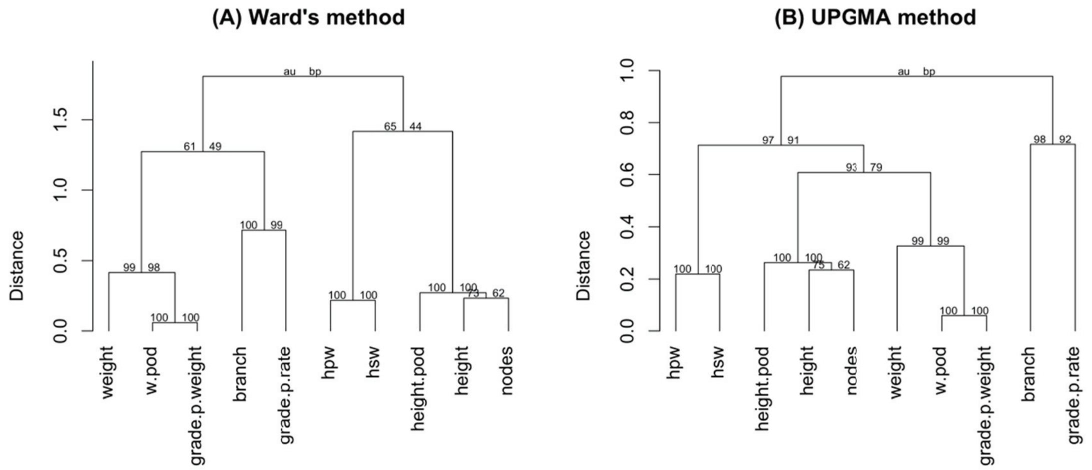

Fig. 2. The results of clustering for 10 selected agronomic traits of vegetable soybean yield data using (A) Ward's method and (B) UPGMA method. The numbers showing above every horizontal bars are the 100 × probability of approximate unbiasedness (AU) and 100 × bootstrap probability (BP).

第一群：分枝數、合格莢率；

第二群：植株高度、結莢高度、百莢重、百粒重、主莖節數、單株總莢重、合格莢重、植株鮮重。

進而將集群分析篩選出之10個性狀進行因素分析，依照陡坡圖(Fig.3)較明顯的轉折點約在第 5 個因素的位置；然而考慮到全體 10 個因素中，所有都是在農業發展認定上與產量有關的性狀，取 5 個因素除難以有效縮減性狀以外，在因素生物意義的解讀上也較為困難，因此參考集群分析的分群結果，本研究認為取 2 至 3 個因素應足夠解釋產量。陡坡圖在取 3 個因素時的轉折點雖然不若 5 個因素時明顯，但選擇前 3 個因素的累積變異解釋量已達 0.64 (Table 1)，因此最終選擇 3 個因素。根據因素成分之負荷(Table 1)，可分別解釋其生物意義如下：

(1)株型(plant type)因素：在此因素中負荷量較高者為植株高度、結莢高度、主莖節數之三個性狀。在改良毛豆品種時通常不會選拔植株過高的品系，其除有易倒伏問題外，通常也不利於機械收穫，因此在人為選拔下，毛豆株型會傾向於中低高度(不易倒伏)且生長整齊(有利機械栽培)的方向選拔。

(2)經濟產量(economic yield)因素：在此因素中負荷量最高者是單株總莢重與合格莢重之兩個性狀。所謂經濟產量的意義，在於單位面積上得到具有經濟價值的主產物數量，為一般農業意義上之產量。

(3)能量分配(energy partition)因素：在此因素中負荷量最高的性狀為合格莢率，除合格莢率外其他性狀之負荷量絕對值

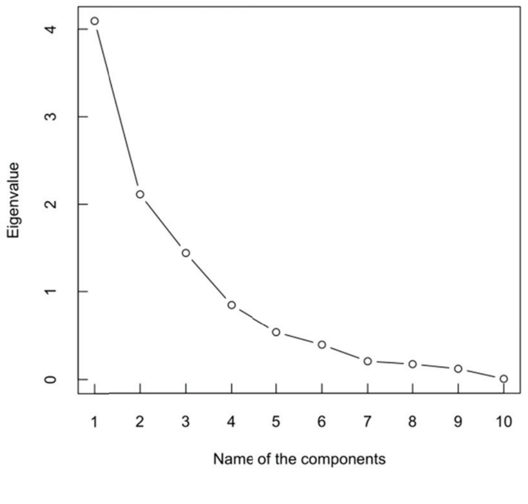

Fig. 3. Scree plot of factor analysis using 10 selected agronomic traits of 13 vegetable soybean lines.

Table 1. Factor loadings and the explained variances proportions for the first three factors in factor analysis using 10 selected agronomic traits of vegetable soybean. The abbreviations in the plots are listed in the appendix. The loadings greater than 0.7 are bold-faced.

Trait	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Height	**0.953**	0.149	-0.083
Height.pod	**0.773**	0.095	0.062
Branch	-0.009	0.150	0.294
Nodes	**0.759**	0.348	0.091
Weight	0.499	0.614	0.079
W.pod	0.220	**0.948**	0.221
Hpw	0.353	0.236	-0.101
Hsw	0.256	0.364	-0.155
Grade.p.rate	-0.030	-0.068	**0.995**
Grade.p.weight	0.177	**0.826**	0.531
% of Variance Explained	0.260	0.233	0.147
Cumulative % of Variance Explained	0.260	0.493	0.639

均小於 0.7。合格莢率為合格莢重與單株總莢重之比值，此涉及作物內部產物的分配，若經由此因素獲得的指標值愈高，則代表在單株總莢重中分配至合格莢重的比例愈高。

由此因素分析結果，確實可將毛豆多個產量相關性狀具有生物意義的因素擷取出來，以供後續穩定性分析。

限於篇幅，本文僅以第二因素之經濟產量為例，來說明穩定性分析結果。以 Bartlett 法所計算出的各品種(系)與環境組合於第二個因素之得點，如 Table 2 所示。此 13 個品系(種)於 4 個環境點的因素得點將作為穩定性分析的資料集，經綜合變方分析結果，顯示品系與環境間交感效應顯著存在（未列表），故再以 Finlay and Wilkinson 分析法進行穩定性分析，所估得的各品種(系)之因素得點平均值與穩定性係數列於 Table 3，第二個因素的因素得點代表整體平均經濟產量，其表現高低前五名分別為 KVS1472、KH9、AGS446、KVS1560 及 AGS444，而 sayakomachi 最低，此對應原始 10 個性狀資料，KVS1472 具有平均最高的單株總莢重、總莢重及合格莢重，而 Sayakomachi 則具有平均最低的單株總莢重、百莢重、總莢重及合格莢重，顯示出利用因素得點同時考量數個性狀的特性，得以對所有產量性狀做一整體評估，而不至於造成不同性狀得出矛盾之結論；各品系 (種)之因素得點的穩定性係數最接近 1 (具平均穩定性)之前三名依序為 KVS1554、AGS444、sayakomachi。由於符合農業穩定性品種必須同時符合高產及較佳穩定性，因此將各品種(系)之因素得點平均值與穩定性係數之關係，進而繪製散佈圖如 Fig. 4。由圖中顯示，KVS1472 與 KH9 皆高產但相較於其他品系(種)稍不穩定(平均因素得點較其他品系大，而 b 約 1.2 稍大於 1)，KVS155 與 AGS444 之經濟產量表現稍高於整體平均且具平均穩定性(正值因素得點近於 0，且 b 接近 1)；AGS446 與 KVS1560 之經濟產量較高於整體平均，卻也呈現相當恆定(因素得點略大於 0，b 甚小於 1 但近於 0)，尤以 AGS446 的 b 值更小且因素得點值僅次於 KVS1472 與 KH9。該毛豆區域試驗中包含 3 個現有品種(KH9、TA2、Sayakomachi)作為對照，由圖中可看出，這三個對照品種都是具農業穩定概念品種，其中以 KH9 經濟產量最高(惟相對於其他兩個對照品種稍顯不

Table 2. The factor scores of the second factor from factor analysis using 10 selected agronomic traits for 13 vegetable soybean lines in eight environments (2 years × 2 crop seasons × 2 locations).

	Fall crop of 2008		Spring crop of 2009		Fall crop of 2009		Spring crop of 2010	
Line	Wandan	Meinong	Wandan	Meinong	Wandan	Meinong	Wandan	Meinong
AGS444	-1.358	-1.195	0.598	0.724	0.898	0.428	1.123	0.336
AGS445	-2.486	-2.385	-0.339	0.239	0.825	0.216	-0.422	-0.671
AGS446	-0.615	-0.803	2.647	0.135	1.084	0.305	-0.195	0.275
KH9	-0.952	-0.085	1.088	1.269	0.351	1.885	0.318	-0.090
KVS1286	-1.223	-0.807	0.313	0.918	-1.154	1.061	-1.097	-1.259
KVS1472	-0.676	-0.166	1.189	1.462	1.190	1.872	1.072	-0.222
KVS1554	-1.033	-1.269	0.154	1.366	-0.343	0.650	1.171	0.208
KVS1560	-0.771	0.451	-1.033	0.646	-0.604	1.959	0.521	0.400
Sayakomachi	-2.069	-0.833	-0.862	-0.209	-0.542	0.768	-1.259	-0.730
TS92-101V	-1.537	0.756	-0.672	0.990	0.020	0.271	0.390	0.151
TS92-63V	-1.183	-0.545	-0.850	0.870	-0.616	1.102	-1.665	-1.185
TS92-95V	-0.917	0.591	-0.861	0.620	1.846	0.812	-0.144	-0.861
TA2	-1.163	-0.564	0.474	0.708	-0.280	1.691	-0.348	-0.261

Table 3. The average and stability coefficients (b) of factor scores from the second factor using 10 selected agronomic traits for 13 vegetable soybean lines.

	Factor score of 2nd factor	
Line	Average	b
AGS444	0.194	0.967
AGS445	-0.628	1.440
AGS446	0.354	0.601
KH9	0.473	1.224
KVS1286	-0.406	1.115
KVS1472	0.715	1.233
KVS1554	0.113	0.984
KVS1560	0.196	0.782
Sayakomachi	-0.717	1.036
TS92-101V	0.046	0.670
TS92-63V	-0.509	1.047
TS92-95V	0.136	0.746
TA2	0.032	1.155

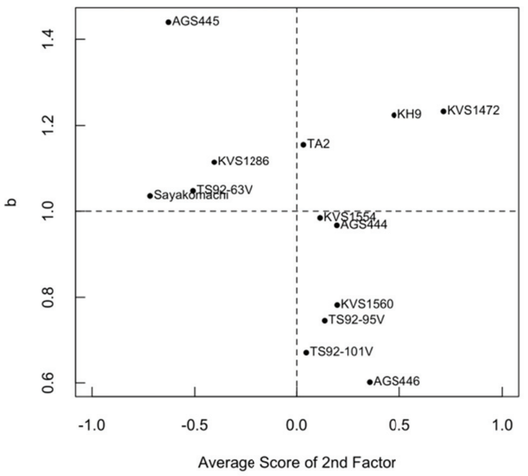

Fig. 4. The scatter plot of average and stability coefficients (b) of factor scores from the second factor using 10 selected agronomic traits for 13 vegetable soybean lines.

穩定)，而 TA2 的經濟產量及穩定性皆近於平均，Sayakomachi 經濟產量雖穩定但表現最差。因此，若育種目標以優於 KH9 為選拔依據，則 KVS1472 應是可以優先考慮選擇的對象，惟必須注意其穩定性與 KH9 相近，雖在環境改善下經濟產量可獲增進，但在不利環境下減產之風險亦相對高於其他品系(種)；其次可選擇 AGS446，其產量雖略低於 KH9 但在不同環境下表現較為一致。至於 KVS1554 與 AGS444，則表現雖不如 KH9，但可優於對照品種 TA2。

從本研究結果顯示，藉由多變數分析方法可擷取出區域試驗多性狀資料中具有生物意義的因素。以毛豆區域試驗資料為例，先

透過集群分析的分群篩選，選取出分枝數、合格莢率、植株高度、結莢高度、百莢重、百粒重、主莖節數、單株總莢重、合格莢重、植株鮮重等 10 個性狀作為因素分析的變數，而經由因素分析產出的三個因素可分別解釋株型、經濟產量及能量分配三個面向，以取得與產量相關的綜合指標，藉此可進而對這些綜合指標個別進行穩定性分析，用以選出符合育種目標下具優良表現且穩定之品系。

誌謝

本研究承蒙行政院科技部計畫(102-2118-M-002-001)經費補助，特此致謝。

引用文獻

Bartlett MS (1937) The Statistical Conception of Mental Factors. **Br. J. Psychol. Gen. Sect.** 28:97–104.

Chen H, B Kuo (2002a) The Study on the Analysis of Genotype × Environment Interaction Effect Using Different Models I. Using Classical Regression Model to Interpret Interaction Effect. (in Chinese with English abstract). **J. Agric. For.** 51:11–19.

Chen H, B Kuo (2002b) Studies on the Analysis of Genotype Environment Interaction Effect Using Different Models (Ⅱ) - Introduction to AMMI Model. (in Chinese). **Sci Agric** 50:362–371.

Chen H, B Kuo (2003) The Study on the Analysis of Genotype × Environment Interaction Effect Using Different Models (Ⅲ) - Using AMMI Model to Analyze Interaction Effect. (in Chinese with English abstract). **J Agric. Assoc. Taiwan** 4:234–244.

Eberhart S, W Russell (1966) Stability Parameters for Comparing Varieties. **Crop Sci.** 6:36–40.

Everitt B (2011) Cluster Analysis. Wiley, Hoboken.

Felsenstein J (1988) Phylogenies from Molecular Sequences: Inference and Reliability. **Annu. Rev. Genet.** 22:521–565.

Finlay K, G Wilkinson (1963) Analysis of Adaptation in a Plant-Breeding Programme. **Aust. J. Agric. Res.** 14:742–754.

Hwu K, LD Liu (2013) Stability Analysis Using Multiple Environment Trials Data by Linear Regression. (in Chinese). **Crop Environ. Bioinform.** 10:131–142.

Johnson RA, DW Wichern (2008) Applied Multivariate Statistical Analysis. 6th Ed.,Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J. 800pp.

Lu H-Y (2004) A Review of Linear Regression in Stability Analysis - Comparisons of Statistical Method, Graphical Presentation, Interpretation and Efficiency. (in Chinese). **Sci. Agric.** 52:260–268.

Perkins JM, JL Jinks (1968) Heredity - Abstract of article: Environmental and genotype-environmental components of variability III. Multiple lines and crosses. **Heredity** 23:339–356.

Shafii B, KA Mahler, WJ Price, DL Auld (1992) Genotype × Environment Interaction Effects on Winter Rapeseed Yield and Oil Content. **Crop Sci** 32:922–927.

Shafii B, W Price (1998) Analysis of Genotype-by-Environment Interaction Using the Additive Main Effects and Multiplicative Interaction Model and Stability Estimates. **J. Agric. Biol. Environ. Stat.** 3:335–345.

Suzuki R, H Shimodaira (2006) Pvclust: an R package for assessing the uncertainty in hierarchical clustering. **Bioinformatics** 22:1540–1542.

Thomson GH (1938) Methods of Estimating Mental Factors. **Nature** 141:246.

Zobel RW, MJ Wright, HG Gauch (1988) Statistical Analysis of a Yield Trial. **Agron. J.** 80:388–393.

－編輯：楊純明